УДК 620.179

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

В.Н. Цицура, О.И. Силантьев, В.Ю. Алхимов, В.К. Кулешов, Ю.В. Алхимов

Томский политехнический университет
E-mail: oleg.silantiev@mail.ru

Рассмотрены вопросы формирования видимого изображения в матричном газоразрядном преобразователе рентгеновского излучения. Проведены расчеты нерезкости видимого изображения. Определены частотно-контрастные характеристики преобразователя.

Введение

Одна из основных проблем в рентгеновском неразрушающем контроле и медицинской рентгенодиагностике это снижение доз облучения объектов контроля. Решение проблемы идет разными способами, но основной из них – разработка эффективных высокочувствительных преобразователей рентгеновского излучения. В этом отношении перспективны газовые детекторы ионизирующих излучений. Газовые детекторы широко используют в ядерной физике. Это искровые камеры, применяемые для регистрации треков элементарных частиц [1]. Аналогичные детекторы можно применять для регистрации изображений, создаваемых ионизирующим излучением, путем накопления регистрируемой информации. Механизм создания центров ионизации и развития разряда в таких детекторах хорошо изучен. На начальной стадии своего развития газовый разряд качественно может быть описан в соответствии с таундсендовским механизмом [2, 3]. Механизм Таунсенда при описании разряда справедлив до тех пор, пока можно пренебречь электрическим полем пространственного заряда электронов и ионов по сравнению с внешним полем. Экспериментальные исследования [4, 5] показали, что вследствие искажения поля пространственными зарядами уже при небольшой плотности тока наступает заметное увеличение ионизации, и условие самостоятельности разряда выполняется при меньших значениях напряженности электрического поля в разрядном промежутке.

Еще одним решением является использование газоразрядного преобразователя (ГРП) рентгеновского излучения в видимое, который представляет собой плоскую герметичную камеру, наполненную инертным газом [6–8]. На двух противоположных диэлектрических стенках камеры расположены электроды, причем выходной электрод прозрачен для видимой части спектра. Расстояние между электродами составляет не более 1 см. В таком детекторе используется многоканальный коллективный разряд в газе. При облучении преобразователя импульсным рентгеновским излучением в результате первичной ионизации рабочего газа рентгеновскими фотонами и электронами, эмитированными из материала входного электрода, формируется скрытая электронно-ионная картина объекта контроля. Плотность ионизации в различных участках разрядного промежутка пропорциональна интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через области объекта контроля с различными коэффициентами ослабления. Когда на электроды подается прямоугольный импульс высокого напряжения, в газе из областей первичной ионизации развиваются разряды, сопровождающиеся интенсивным выходом излучения видимого и ультрафиолетового участков спектра. Спектральные характеристики свечения определяются типом рабочего газа и его параметрами. Видимая картина образуется свечением многочисленных разрядов, развивающихся параллельно. Такой преобразователь обладает хорошими параметрами чувствительности – изображение формируется при дозах облу-

чения в плоскости преобразователя порядка 10 мкР [6]. Но яркость свечения преобразователя невелика. Для визуального наблюдения требуется темновая адаптация оператора, а использование фотографического или телевизионного оборудования затруднено.

Яркость свечения преобразователя можно значительно повысить, если преобразовать ультрафиолетовое свечение разряда, составляющее основную часть излучения, в видимое. Для этого можно использовать слой люминофора, нанесенный на один из электродов.

ГРП с люминесцентным слоем

Было изготовлено несколько экспериментальных образцов ГРП, у которых внутрь газового объема на электрод был нанесен слой люминофора (виллемит). Проведенные эксперименты показали, что яркость изображения значительно возрастает и составляет порядка 20...30 Кд/м^2. Изображение можно легко наблюдать при внешнем освещении и регистрировать фото- и видеокамерами. Однако при этом наблюдалось ухудшение пространственного разрешения видимого изображения. Экспериментально собственную нерезкость ГРП определяли по размытию изображения резкого края, сформированного тонкой свинцовой мирой с образованными на ней группами продольных прорезей, шаг которых соответствует определенному значению разрешающей способности. Эксперименты [6, 7] выявили невозможность получения разрешающей способности конечных изображений более 0,7...0,8 пар лин./мм при использовании ГРП с так называемым «коллективным» разрядом, т. е. полностью изотропным единым газоразрядным промежутком. Такая разрешающая способность недостаточна для решения некоторых задач рентгеновского контроля.

Основной вклад в ухудшение разрешающей способности ГРП с люминесцентным слоем вносит процесс переноса квантов ультрафиолетового излучения от точки испускания до слоя люминофора. Головка распространяющейся в газе лавины испускает ультрафиолетовое излучение равномерно по всем направлениям, и точечный источник ультрафиолетового излучения на слое люминофора будет изображаться в виде размытого пятна с максимумом в точке, являющейся проекцией точки-источника на плоскость слоя люминофора. Для увеличения разрешающей способности необходимо уменьшить площадь пятна размытия. Один из способов решения заключается в том, чтобы за счет формы и амплитуды импульса высоковольтного питания ГРП сформировать плоский разряд предельно плотной структуры таким образом, чтобы максимальная энергия излучения выделялась в непосредственной близости от электрода со слоем люминофора. Это очень трудная задача, требующая дополнительных исследований.

Более простой способ – физически разделить разряды путем ввода в газовый объем диэлектрической решетки. Мы приходим к усовершенствованной конструкции ГРП – матричному газоразрядному преобразователю (МГРП). МГРП представляет собой (рис. 1) разрядный промежуток, образованный двумя плоско-параллельными электродами и питаемый импульсами высокого напряжения. В газовом объеме между электродами сформирована матричная решетка, которая локализует разрядный промежуток, разделяя его на индикаторные ячейки. На внутренней поверхности входного электрода в ячейках нанесен слой люминофора, который преобразует ультрафиолетовое свечение газового разряда в видимое излучение. Кроме того, матричная решетка определяет высокую точность межэлектродного расстояния, обеспечивая равномерность распределения напряженности электрического поля в МГРП.

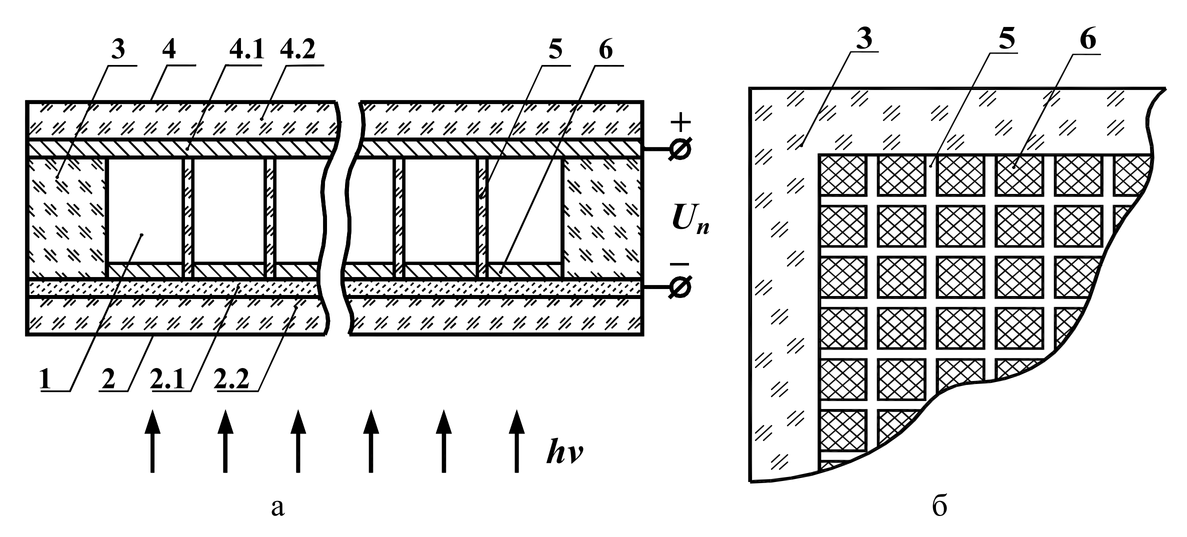


Рис. 1. *Газоразрядный преобразователь рентгеновского излучения в разрезе (а – вид сбоку, б – вид сверху): 1) газовый объем; 2) входной электрод; 2.1) катод (непрозрачный электрод); 2.2) стеклянная пластина; 3) диэлектрическая рамка; 4) выходной электрод; 4.1) анод (прозрачный электрод); 4.2) стеклянная пластина; 5) матричная решетка; 6) люминофор*

Главное преимущество матричной технологии в том, что стеклянные диэлектрические барьеры между ячейками препятствуют распространению ультрафиолетового излучения в боковом направлении, ограничивая возбуждение люминофорного покрытия в пределах каждой ячейки, и, соответственно, исключают взаимодействие соседних разрядов. Люминофорное покрытие будет возбуждаться лишь излучением, падающим на него в определенном телесном угле, что и обеспечивает высокую разрешающую способность. По существу, матричный газоразрядный преобразователь состоит из множества индикаторных газоразрядных ламп, которые соединены электродами в единую матричную систему.

Частотно-контрастные характеристики МГРП и ГРП с люминесцентным слоем

Оценим параметры видимого изображения в ГРП и ГРП с люминесцентным слоем. Для этого используем частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) преобразователей. ЧКХ изображающего устройства $T(\nu)$ это отношение контраста на выходе и входе преобразователя в зависимости от пространственной частоты ν при условии, что на вход устройства подано изображение синусоидального профиля [9] (часто ЧКХ называют функцией передачи модуляции). ЧКХ однозначно определяет качество получаемых изображений и вносимые изображающим прибором искажения.

ЧКХ отвечает требованию мультиплексности, т. е. процесс формирования изображения при различных режимах работы можно рассматривать как цепь передачи изображений из k последовательных звеньев [9]:

$$T_{\Sigma}(\nu) = \prod_{i=1}^{k} T_i(\nu). \qquad (1)$$

ЧКХ каждого звена и системы представляет собой преобразование Фурье от функции рассеяния линии (ФРЛ) $\psi(x)$, где x – пространственная координата перпендикулярная направлению линии [10]:

$$T(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)\exp(-2\pi i x\nu)dx.$$

Таким образом, в ГРП процесс формирования видимого изображения состоит из двух основных стадий: 1) формирование скрытого электронно-ионного изображения (т. е. центров ионизации, из которых развиваются разряды) под действием рентгеновского излучения; 2) развитие разряда и формирование фотонного излучения. Для ГРП с люминесцентным слоем будет добавляться третья стадия – распространение ультрафиолетового излучения в газе и преобразование этого излучения в видимое слоем люминофора.

Начальное звено в процессе преобразования изображения в ГРП – формирование теневого изображения в виде пространственного распределения первичной ионизации. Оно формируется в газовом объеме первичными электронами, образованными при прохождении рентгеновских фотонов через входной электрод (катод) и газовое наполнение преобразователя [11]. Для определения ЧКХ этой стадии преобразования можно использовать результаты моделирования переноса излучения в ГРП. Первоначальное радиальное распределение поглощенной энергии и характеристики электронов определяются методом Монте-Карло [11]. Расчетные гистограммы радиального распределения плотности поглощенной энергии можно аппроксимировать кривой:

$$B(x) = B_0 + 0{,}5\Delta B\left[1 + 2\Phi\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)\right], \qquad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)\cdot dt$ – функция Лапласа, σ – параметр распределения, x – координата.

На рис. 2 представлены зависимости радиального распределения поглощенной энергии в МГРП и ГРП рассчитанные по формуле (2).

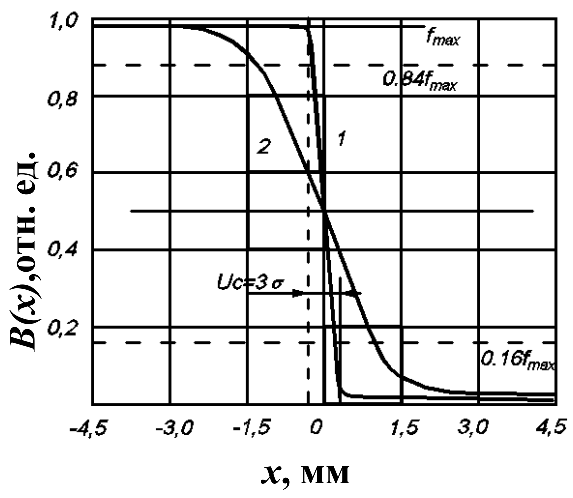


Рис. 2. *Зависимость распределения поглощенной энергии от резкого края полубесконечной границы: 1) для МГРП, 2) для ГРП (толщина разрядного промежутка 5 мм). Кривые нормированы по кривой 1*

Параметр распределения σ определяли по пограничной кривой в соответствии с методикой [11]. В этом случае ЧКХ распределения первичной ионизации имеет вид:

$$T_i(\nu) = \exp[-2(\pi\sigma\nu)^2].$$

Рассчитаем ЧКХ стадии распространения ультрафиолетового излучения. Будем считать, что в некоторый момент времени в точке R=0, расположенной на высоте z от слоя люминофора, находится точечный источник ультрафиолетовых квантов. Если предположить, что яркость свечения люминесцентного слоя пропорциональна полному потоку фотонов, упавших на слой, то функция рассеяния точки (ФРТ), представляющая собой нормированное радиальное распределение яркости свечения люминофора, возбуждаемого точечным источником ультрафиолетового излучения, имеет вид:

$$B(R)=\frac{1}{2\pi d_c}\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{\sqrt{R^2+d_c^2}}\right),$$

где d_c – толщина слоя люминофора, R – расстояние от центра.

ФРЛ, которая характеризует изображение от цепочки центров люминесценции, можно найти, используя выражение для ФРТ по формуле [11]:

$$B^*(x)=2\int_x^{\infty}B(R)\sqrt{R^2-x^2}\rho d\rho=\frac{1}{\pi d_c}\ln\sqrt{1+\frac{d_c^2}{x^2}},$$

где ρ – полярная координата.

Краевая функция резкой полубесконечной границы определяется как:

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x}B^*(x)dx=$$

$$=\begin{cases}\frac{1}{\pi d_c}\left[\frac{\pi d_c}{2}+x\ln\sqrt{1+\frac{d_c^2}{x^2}}+ +d_c\arccos\left(1+\frac{d_c}{\sqrt{x^2+d_c^2}}\right)\right], x\geq 0\\ \frac{1}{\pi d_c}\left[\frac{\pi d_c}{2}+x\ln\sqrt{1+\frac{d_c^2}{x^2}}- -d_c\arccos\left(1+\frac{d_c}{\sqrt{x^2+d_c^2}}\right)\right], x<0\end{cases}.$$

Выражение для ЧКХ $T_{UV}(\nu)$ теневой картины ультрафиолетового излучения найдем, используя преобразование Ханкеля [12]:

$$T_{UV}(\nu)=2\pi\int_0^{\infty}B(R)\cdot J_0(2\pi R\nu)\cdot RdR=$$
$$=\frac{1}{2\pi\nu d_r}(1-e^{-2\pi\nu d_r}),$$

где d_r – величина разрядного промежутка, J_0 – функция Бесселя первого рода первого порядка.

ЧКХ $T_L(\nu)$ нерассеивающего люминесцентного слоя [12]:

$$T_L(\nu)=\frac{K_0(\tau\sqrt{4\pi^2\nu_0^2+1})}{K_0(\tau)};$$

где K_0 – функция Макдональда, τ – оптическая толщина слоя люминофора для длины волны света люминесценции, ν_0 – безразмерная оптическая частота.

Общая ЧКХ ГРП с люминесцентным слоем с учетом (1) будет иметь вид:

$$T_{ГРП}(\nu)=\frac{\exp[-2(\pi\sigma\nu]^2(1-e^{-2\pi\nu d_r})K_0(\tau\sqrt{4\pi^2\nu_0^2+1})}{2\pi\nu d_r K_0(\tau)},$$

На рис. 3 показаны расчетные зависимости ЧКХ. Из рисунка видно, что добавление люминесцентного слоя значительно ухудшает ЧКХ конечного видимого изображения.

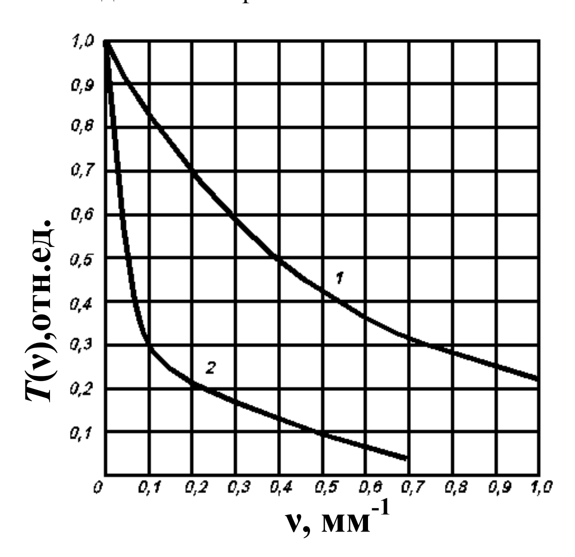


Рис. 3. Зависимость частотно-контрактных характеристик T(ν) от пространственной частоты: 1) ГРП, 2) ГРП с люминесцентным слоем

В случае МГРП разрешающая способность изображения будет определяться размерами отдельной разрядной ячейки. Расчеты показали, что распределение поглощенной энергии рентгеновского излучения в пределах ячейки будет равномерным, т. е. стадия формирования скрытого теневого изображения не будет оказывать значительного влияния на конечное изображение. Свечение люминофора в пределах ячейки тоже будет равномерным. Существующие технологии производства газоразрядных индикаторных панелей, которые по технологии изготовления очень близки к МГРП, позволяют путем пескоструйной обработки обеспечить размеры ячейки 0,3×0,3×0,5 мм [9]. Это означает, что, применив матричную технологию организации разрядного промежутка, теоретически можно увеличить разрешающую способность ГРП до значений порядка 3 пар лин./мм.

Заключение

Использование газоразрядных преобразователей с люминесцентными слоем позволяет получать изображения объектов контроля при дозах облучения порядка 10 мкР. Это значительно снижает опасность рентгеновского обследования, делает ненужной сложную и тяжелую защиту от радиации, уменьшает вес и габариты рентгенодиагностических установок. Значительно улучшить параметры изображения при сохранении остальных преимуществ газоразрядных преобразователей позволяет матричная организация газового объема. Проведены расчеты нерезкости видимого изображения, определены частотно-контрастные характеристики преобразователя в сравнении с прототипом. Расчеты показывают, что использование матричных преобразователей позволяет улучшить ка-

чество получаемого изображения с 0,7 до 2...3 пар лин./мм. Это делает перспективным применение таких преобразователей в промышленных и медицинских рентгеновских диагностических системах. Дальнейшим путем улучшения качества изображения будет переход от оптического съема изображения с газоразрядных преобразователей к электрическому и компьютерная обработка полученного сигнала, что является темой наших дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 06-08-00772а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дайон М.И., Долгошеин Б.А., Ефременко В.И., Лексин Г.А., Любимов В.А. Искровая камера. – М.: Атомиздат. 1967. – 318 с.
2. Мик Дж., Карэгс Дж. Электрический пробой в газах. – М.: Иностранная литература, 1960. – 605 с.
3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. – М.: Атомиздат, 1961. – 323 с.
4. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 271 с.
5. Гораховский В.Л. Электрический ток в газе. – М.: Наука, 1971. – 476 с.
6. Alkhimov Yu.V., Kuleshov V.K., Kim Y.D. High-Sensitive X-Ray Detectors Using Gas Discharge with Extreme Dense Structure for Amplification and Visualization of X-Ray Images // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference: Proc. of IEEE Intern. Conf. – Puerto Rico, USA, 2005. – P. 1161–1168.
7. Alkhimov Yu.V., Kuleshov V.K., Kim Y.D. Television System for Recording Impulse Images in a Visual and Ultraviolet Part of a Spectrum for the Purposes of Medical Diagnostics // Systems, Signals and Devices: Proc. of 3rd IEEE Intern. Conf. – Sousse, Tunisia, 2005. – P. 643–651.
8. Алхимов Ю.В., Кулешов В.К., Ковалева Л.Э. Регистрация рентгеновских изображений детекторами, использующими газовый разряд предельно плотной структуры // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 5. – С. 98–105.
9. Воронов А.А., Дедов В.П. Принципы построения и проблемы совершенствования плазменных дисплеев // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 6. – С. 104–107.
10. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. – М.: Мир, 1978. – 670 с.
11. Беспалов В.И., Зайцев А.К., Кононов М.Ю., Кулешов В.К. Собственная нерезкость газоразрядных преобразователей, работающих с высокоэнергетическим тормозным излучением // Дефектоскопия. – 1988. – № 1. – С. 71–78.
12. Ланшаков В.Н., Кулешов В.К. Яркость свечения газоразрядно-люминесцентных преобразователей импульсного рентгеновского излучения // Дефектоскопия. – 1986. – № 11. – С. 58–62.

УДК 541.18.02